

CAMBIO CLIMATICO Y PALEOHIDROGEOLOGIA

Trinidad Torres

UPM-ETSIMN

Carmen Bajos

ENRESA

Fernando Recreo

CIEMAT

1. Introducción

El concepto de almacenamiento geológico profundo para residuos radiactivos de alta actividad o con radionucleidos de vida larga cifra una parte importante de su seguridad a largo plazo en el comportamiento del medio geológico. El inventario de fenómenos, sucesos y procesos (FEPs) a tener en cuenta en la evaluación del almacenamiento permite agrupar los factores que intervienen en la evolución del sistema geológico en dos grupos: los que denominamos factores geodinámicos internos, cuyo origen se encuentra en la corteza terrestre y en el manto, y los factores geodinámicos externos, que dependen de manera más o menos directa de la radiación solar y de la composición y dinámica de los fluidos terrestres, en particular de la atmósfera y de la hidrosfera.

Por otro lado, las escalas temporales que se consideran en los procesos de migración de los radionucleidos desde los almacenamientos de residuos radiactivos hasta el medio ambiente accesible al hombre son de tal magnitud, que los caminos de exposición que serán relevantes en el momento de una eventual liberación de los radionucleidos a la biosfera pueden no coincidir plenamente con los que son importantes en las actuales condiciones. Esta realidad hace necesario considerar también los efectos del cambio ambiental en las evaluaciones de la seguridad a largo plazo de los sistemas de almacenamiento geológico.

Las variaciones climáticas son resultado de las variaciones en la cantidad y en la distribución de la radiación solar recibida y retenida por el sistema, ya que como tal, el sistema climático está controlado termodinámicamente, siendo la radia-

ción solar la principal fuerza motriz externa del mismo.

La teoría de que las variaciones en la intensidad estacional de la radiación solar como resultado de factores astronómicos podía dar lugar a glaciaciones periódicas ya fue expresada, al final del siglo XIX, por el matemático francés J. Adhémar, pero la teoría fue ulteriormente refinada y formalizada por el astrónomo M. Milankovitch (asocia los ciclos glaciales con los cambios en la distribución de la radiación solar que se producen como resultado de las variaciones geométricas de la órbita de la Tierra). Estas variaciones dependen de tres elementos que tienen carácter periódico: la precesión de los equinoccios (23 ka), la oblicuidad (41 ka) y la excentricidad (96 ka de período).

El convencimiento de que para evaluar la seguridad a largo plazo de un almacenamiento de residuos radiactivos es necesario determinar cómo afectarán los cambios climáticos futuros a dicha seguridad, llevó a ENRESA a promover y a participar junto con el ITGE, el BRGM de Francia y el CSIC en el proyecto "Paleo-Climatological Revision of Climate Evolution and Environment in Western Mediterranean Regions", realizado dentro del 4º Programa de I+D de la Comunidad Europea (1990-94), en su Tarea 4 "Disposal of Radioactive Waste", (Proyecto CE-FI2W-CT91-0075). Del mismo modo, CIEMAT y ENRESA participaron conjuntamente en otro proyecto comunitario del mismo 4º Programa, esta vez en la Tarea 5 "Method of Evaluating the Safety of Disposal Systems", con el título "Consideration of Environmental Changes in Long-Term Radioactive Waste Disposal System Evaluations", publicado como EUR 16751 EN, en 1996. Al mismo tiempo, también dentro de la Tarea 5 del 4º Programa, CIEMAT y ENRESA contri-

buyeron al Proyecto EVEREST con la redacción del Capítulo 4, Climate Change. Finalmente, entre 1994 y 1996, CIEMAT junto con ANDRA e IPSN (han llevado a cabo el proyecto MICE (Method to Integrate Climate Evolution), cuyo objetivo es definir un método para describir cuantitativamente ciertas "biosferas de referencia" para su utilización en la evaluación de seguridad a largo plazo.

2. Efectos del cambio ambiental en el sistema de almacenamiento

Todos los procesos que participan en el cambio ambiental actúan conjuntamente, como un sistema único, aunque complejo. De los factores del cambio ambiental identificados (factores astronómicos, climáticos, tectónicos, antropogénicos y genéticos), los que mayor influencia ejercen sobre el comportamiento de los sistemas de almacenamiento geológico son los climáticos y los tectónicos.

2.1 Efecto del cambio climático

El cambio climático es un fenómeno global, a escala planetaria. Considerado a esta escala y teniendo en cuenta las modificaciones climáticas más probables que se infieren de la teoría de Milankovitch y del registro geológico pasado, en los próximos 105-106 años el cambio climático puede dar lugar a dos macrofenómenos con importantes repercusiones en la superficie de la Tierra (Fourniquet, J., 1988):

- 1) el desarrollo de grandes placas de hielo, conocidas como inlandsis, que, a su vez provocarían movimientos isostáticos descendentes, durante su formación y un rebote isostático ascensional durante la deglaciación, y
- 2) cambios en el nivel del mar, directamente relacionados con el crecimiento y fusión de dichas placas.

Así como los procesos relacionados con la erosión por descenso del nivel del mar tienen carácter general y afectarán, en mayor o menor grado, a todas las áreas susceptibles de albergar un almacenamiento, los efectos relacionados con las modificaciones tensionales por sobrecarga glaciaria o la erosión subglaciaria quedarán reducidos a las áreas donde se desarrollen las placas de hielo. El desarrollo del permafrost (y sus implicaciones en la recarga y en la circulación subterránea) no es exclusivo de las zonas inmediatas a las placas de

hielo, aunque, sin duda, la presencia de éstas enfatizará la importancia del fenómeno.

2.1.1 Impacto sobre el sistema hidrológico/hidrogeológico

El impacto potencial del cambio climático sobre las variables hidrológicas clave (precipitación, evapotranspiración y escorrentía) no se conoce bien aún (Zektser I.S and Loaiciga, H.A., 1993), y se hace difícil evaluar de manera fiable las modificaciones del ciclo hidrológico como resultado del cambio climático a largo plazo, tanto por la complejidad de las interacciones entre la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera y la geosfera (Wolman, 1991) como por la baja capacidad predictiva de los modelos de circulación general (Tsonis, A., 1991).

Finalmente, aunque el clima juega un papel importante en cuanto al flujo hidrogeológico, la respuesta de éste a las variaciones climáticas –fundamentalmente expresadas por las modificaciones de la recarga (y en menor grado, de la evapotranspiración)– es una respuesta diferida, normalmente de forma significativa, especialmente en lo que se refiere a flujos subterráneos profundos los de mayor interés en el análisis del comportamiento de los almacenamientos de residuos radiactivos.

2.2 Consideración del cambio climático en las evaluaciones de la seguridad de los sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos [EUR 16751 EN]

La consideración del cambio climático en las evaluaciones de seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico ha ido tomando cuerpo de manera progresiva desde un primer intento en el US. AEGIS Program, en 1982, hasta la incorporación del concepto mismo de cambio climático en el Escenario Central del Proyecto SITE-94 de SKI.

El Programa AEGIS (Assessment of Effectiveness of Geologic Isolation Systems) de la ONWI del US. Department of Energy desarrolló dos modelos de simulación geológica (GSM y FFSM) como parte de una metodología para demostrar las técnicas de evaluación del comportamiento aplicadas a un repositorio de residuos radiactivos hipotéticamente localizado en una formación de materiales basálticos, la Columbia Basalt Basin del Estado de Washington en los EE.UU. Ambos códigos modelizan

sucesos y procesos (entre ellos el cambio climático, glaciación y variaciones del nivel del mar) y sus influencias en el almacenamiento haciendo uso del método Monte Carlo (Dove, F.H. et al., 1992).

Desde 1982, HMIP (Her Majesty's Inspectorate of Pollution) del Department of Environment del Reino Unido ha financiado un programa para desarrollar una metodología probabilística tiempo-dependiente de evaluación del riesgo (Thompson, 1987; Laurens et al., 1989) que comprende un modelo de cambio climático, TIME-4 (Ringrose et al., 1990) que proporciona datos de entrada al modelo VANDAL (Laurens et al., 1990). TIME-4 trata, mediante un proceso Markov, una sucesión de climas deducidos de los registros paleoclimáticos (Sumerling, 1990). Esta metodología se aplicó a un almacenamiento hipotético para residuos de actividades baja e intermedia emplazado en arcillas (Thompson and Sagar, 1993).

El BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) de Francia introdujo ya en 1980 el concepto y el término de "geoprospectiva" para responder a las demandas específicas del almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad en formaciones geológicas profundas. Esta aproximación, que ha dado origen a una serie sostenida de trabajos de investigación (Contrato FI-1WT-0048-F con la Comisión de las Comunidades Europeas, EUR 12503 FR) y a varias herramientas informáticas (CASTOR, HERODE, GEOPROSPECT), persigue la construcción de escenarios plausibles que sean consistentes con la evolución geológica de la región del emplazamiento. CASTOR simula la evolución del emplazamiento considerando los fenómenos geodinámicos internos y externos de la zona para identificar cómo influyen los fenómenos climáticos en el sistema hidrogeológico (Canceill et al., 1984). Se ha aplicado CASTOR al estudio prospectivo de la evolución natural durante 100.000 años de una zona arbitrariamente elegida de Francia (Canceill et al., 1985) y al estudio de la Cuenca de París próxima al Canal de la Mancha (Filippi et al., 1987).

El Yucca Mountain Site Characterization Plan agrupa varios programas de caracterización del emplazamiento, uno de los cuales es el programa climático. Durante el mismo se están determinando los valores de los parámetros climáticos básicos (precipitación, temperatura y evapotranspiración) a tener en cuenta para estimar las fluctuaciones del nivel freático y las vías de flujo hidrogeológico en la zona durante los próximos

10.000 años. El almacenamiento se construirá en un medio no saturado de tobas volcánicas a techo de una formación carbonatada que constituye el acuífero regional cuyo nivel piezométrico ha fluctuado a lo largo del Cuaternario. El programa de cambio climático trata de estudiar el posible incremento del flujo hidrogeológico como resultado de un aumento de la infiltración y de la recarga, ya que las evidencias paleoclimáticas sugieren que en el pasado geológico las condiciones climáticas fueron más húmedas, con niveles piezométricos sensiblemente más altos que en la actualidad.

SKI ha desarrollado un Escenario Central dentro del Proyecto SITE-94 que considera el cambio climático y para ello se ha basado en los modelos climáticos ACLIN y en la modelización de la respuesta climática a las variaciones orbitales de Imbrie & Imbrie, 1980, que sugieren condiciones glaciales dentro de 5, 20, 60 y 100 ka (King et al., 1994). En el emplazamiento de Aspö se espera que se llegarán a formar placas de hielo durante estos dos últimos máximos; que habrá condiciones de permafrost en el episodio glacial de 20 ka AP pero sin efectos glaciales dentro de 5 ka.

En el proyecto EVEREST (CEC, 1991-1996) se ha considerado el cambio climático de una manera explícita tanto para las formaciones graníticas (Francia) como para las formaciones arcillosas (Bélgica y Francia), y de manera implícita para las formaciones salinas de Holanda y Alemania. No se han tenido en cuenta los efectos del cambio climático, sin embargo, en el caso de las formaciones salinas estratiformes de Francia.

El estudio de la evolución a largo plazo del repositorio y de su medio, así como de las consecuencias radiológicas asociadas, ha seguido la aproximación por escenarios. En el cálculo de las consecuencias se han considerado cuatro biosferas de referencia: una biosfera de clima moderado que se corresponde con la actual situación climática; un clima árido con biosfera de tipo mediterráneo; y dos biosferas bajo condiciones frías y muy frías que se corresponden, respectivamente, a las glaciaciones tipo Würm y tipo Riss. Se han tenido en cuenta, por tanto, los cambios climáticos y sus efectos sobre la hidrogeología y el transporte de radionucleidos en formaciones geológicas graníticas, salinas y arcillosas.

En el estudio realizado sobre el emplazamiento de Mol, en Bélgica, se seleccionó la secuencia climática que para los 125 ka futuros anticipan Goodess y Palutikof (1991) para el Reino Unido. Esta secuencia representaría la evolución climática

esperada en el escenario de evolución normal. Al escenario de glaciación severa (glaciación tipo Riss previsible sólo más allá de los 160 ka), no se le ha concedido la suficiente probabilidad o verosimilitud como para ser incluida en el estudio de Mol durante el proyecto EVEREST.

El emplazamiento en arcillas francés se asume localizado en la Cuenca de París. La secuencia climática que se considera comprende dos ciclos climáticos. El primero, que corresponde al escenario de evolución normal, incluye una glaciación tipo Würm al cabo de 50 ka bajo condiciones climáticas como las actuales; en el segundo, que corresponde al escenario de glaciación severa tipo Riss, el nivel del mar se postula a 140 m respecto al actual. El período total simulado es de 200 ka. Ambos escenarios (de evolución normal y de glaciación severa) se han simulado en secuencia para estudiar la evolución del nivel piezométrico tanto en la propia formación arcillosa como en los dos acuíferos situados a techo y muro de la misma.

Para el emplazamiento en granitos, la secuencia climática considerada comprende un primer período de 25 ka bajo las actuales condiciones climáticas, una glaciación tipo Würm desde los 25 a los 75 ka AP y un tercer período también bajo un clima templado como el actual. Durante el período glacial, la recarga se considera nula debido a la impermeabilidad de la capa de permafrost y el descenso del nivel del mar repercute en la disminución de los niveles piezométricos y de los gradientes hidráulicos regionales. La glaciación se admite reversible e instantánea por lo que no se tienen en cuenta procesos transitorios.

Los resultados obtenidos tanto en el proyecto EVEREST como en el Dry Run 3 del UK DoE-HMIP en 1992, muestran que el futuro cambio climático puede tener influencia en la migración de los radionucleidos a través de la barrera natural geológica y como consecuencia de ello influir en las tasas de dosis esperables. [EUR 16751 EN].

3. Aproximación a la evaluación de los cambios climáticos futuros

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, una de las causas más importantes de la variación medioambiental, si no la que más, es el clima. El clima varía en todas las escalas de tiempo, tanto en respuesta a una dinámica interna como a un amplio rango de factores externos. Una gran parte de la variación climática es aleato-

ria, causada por procesos internos al sistema y por mecanismos de retroalimentación. Frente a este ruido de fondo aparecen componentes estrictamente periódicos de variación provocada por forzamientos externos. Otro factor a tener en cuenta es el hombre que provoca incrementos en la concentración de gases del efecto invernadero, lo cual se presenta como la mayor causa de cambio climático en los próximos cientos de años.

Nuestra habilidad para predecir la variabilidad climática debería ser mayor a escalas de tiempo grandes, puesto que las variaciones regionales (vientos topográficos, tormentas convectivas) contribuyen más que las globales en la varianza climática relativa a medida que disminuye la escala de tiempo. Además de utilizar el Cuaternario como 'análogo' del futuro cambio climático, la teoría de Milankovitch permite la predicción del clima sobre la base del cálculo astronómico de cambios futuros en los parámetros orbitales. Actualmente no es todavía posible obtener con fundamento científico predicciones de las condiciones climáticas futuras a escala global, y más específicamente a escala regional tanto por las limitaciones en el funcionamiento de los MCG, el desconocimiento del ciclo global del carbono y de los efectos potenciales del calentamiento por gases invernadero sobre las corrientes oceánicas y/o condiciones de contorno de la criosfera, como por falta de acuerdo en la política internacional para limitar las emisiones de gases invernadero.

No obstante, sí se puede tener una cierta seguridad en las reconstrucciones paleoclimáticas del último ciclo glacial/interglacial. Por ello, la mayoría de los estudios que han intentado "predecir" el clima futuro sobre las bases de variaciones orbitales y a partir del registro paleoclimático no se extienden más allá de los 150 ka AP.

Para obtener sucesiones probables de estados climáticos futuros los mecanismos que controlan el cambio climático en las escalas de tiempo de interés (125 ka) son dos: forzamiento orbital y efecto invernadero incrementado por actividad humana.

3.1 Reconstrucciones paleoclimáticas

3.1.1 Registros paleoclimáticos

Hay una gran variedad de paleoindicadores del clima. Cada indicador tiene una resolución espacial y temporal propias.

La sensibilidad de los indicadores al cambio climático puede variar con el tiempo. Una fuente de inexactitud (Kukla, 1991) son las escalas temporales de los registros, pues aunque las determinaciones radiométricas de edades y las inversiones paleomagnéticas aporten un marco temporal básico, la subdivisión temporal detallada se tiene que apoyar en modelos muy simplificados que asumen tasas de sedimentación constante.

Para poder reconstruir secuencias climáticas pasadas son necesarios registros continuos razonablemente fiables. Entre de los indicadores terrestres, los datos polínicos son la principal fuente en latitudes templadas y aportan información sobre la vegetación regional y por tanto, del clima regional (Guiot and Pons, 1989). Están limitados a áreas de acumulación continua y a ambientes no perturbados (sedimentos de lago, o turberas), permiten reconstrucciones de periodos relativamente cortos y tienen mucha mayor resolución temporal que los testigos oceánicos, aunque mucha menor representatividad geográfica. Son de difícil interpretación por las diferencias en la productividad del polen y en las tasas de dispersión, y deben utilizarse técnicas estadísticas para derivar estimaciones cuantitativas de temperatura y precipitación.

Un método de reconstrucción cuantitativa asume que los distintos climas (y sus correspondientes tipos de vegetación y espectros de pólenes) que han ido predominando a lo largo del tiempo en un área, se pueden encontrar hoy en día en formas análogas o similares (Guiot and Pons, 1989). Por tanto, para representar climas pasados muy distintos al actual en un área de estudio, se hace necesario disponer de un amplio rango de análogos. De esta manera se establece primero un espectro de polen moderno representativo de una gran zona con amplias variaciones en la vegetación y clima actuales; después se definen de manera precisa los datos climáticos para todos los emplazamientos para los cuales se han obtenido espectros de polen y se identifican los espectros modernos que tienen mayor similitud con cada espectro fósil. Finalmente, se usan los parámetros correspondientes de los mejores análogos para inferir las condiciones climáticas pasadas.

Los inconvenientes de esta aproximación son los siguientes:

- ❑ los requisitos climáticos de la vegetación actual pueden diferir de la del pasado;
- ❑ el rango de las condiciones climáticas pasadas puede no estar totalmente representado hoy en día, y

- ❑ la presencia humana pasada y presente ha modificado la relación vegetación/clima, y por tanto las relaciones ecológicas entre cada taxón de polen y el clima en los conjuntos de datos de polen modernos.

Este método se ha aplicado a los tres registros polínicos disponibles en Francia (La Grande Pile, Les Echets, Lac du Bouchet; los tres pertenecen al mismo área paleobioclimática) y los resultados concuerdan bastante bien con la interpretación botánica 'empírica', y además ha permitido la reconstrucción cuantitativa de P y T anuales y de parámetros estacionales de los últimos 140 ka.

3.1.2 Correlación entre registros regionales y globales y entre registros continentales y oceánicos

Con el fin de extender el análisis de las condiciones pasadas en una cierta región más allá del periodo cubierto por los registros locales disponibles, se hace necesario establecer correlaciones entre datos terrestres regionales a menudo fragmentarios, y registros paleoclimáticos regionales y globales marinos, fundamentalmente continuos.

Hay una serie de problemas a la hora de intentar establecer este tipo de correlaciones. Se puede estar seguro de que ha habido un nº de episodios relativamente cálidos (interestadiales) y de episodios relativamente fríos (estadiales) a lo largo del último ciclo glacial, pero no se puede estar seguro de la cronología precisa de estos sucesos.

Este tipo de correlaciones sólo son fiables cuando se datan con carbono, que permite llegar hasta unos 40000 años, aunque la confianza en las dataciones aumenta a medida que están más próximas en el tiempo.

3.1.3 Reconstrucciones basadas en datos paleoclimáticos

Cuando se interpretan los indicadores surge el problema de que es difícil distinguir entre los efectos de los cambios de precipitación, temperatura, evaporación y los efectos de parámetros no climáticos. Por tanto, estas estimaciones se deberían tratar con precaución. Dada la incertidumbre en los datos, no es posible calcular valores medios de parámetros en emplazamientos específicos, aunque sí calcular los "best estimates" del rango del

cambio de temperatura aplicable a regiones concretas.

Otro problema, son las distintas escalas temporales de los registros. La mayoría de los equipos adoptan la siguiente aproximación en el contexto de los almacenamientos de residuos radiactivos:

- 1) definir el curso probable del cambio climático global futuro, y
- 2) establecer correlaciones entre las variaciones climáticas globales y las condiciones geomorfológicas e hidrogeológicas locales del emplazamiento del repositorio.

3.2 Modelos de climas futuros a escala global

Como ya se apuntó en la introducción, los análisis espectrales de testigos marinos profundos han permitido la identificación de las respuestas climáticas globales a las frecuencias que establece la teoría de Milankovitch. El conocimiento preciso de la relación exacta entre parámetros seleccionados en el registro marino profundo y los parámetros orbitales calculados para el último 1.5 Ma, sugiere que es posible predecir la pauta de los cambios climáticos naturales futuros en el sistema oceánico, sin embargo, ello no determina la magnitud de la respuesta probable en un determinado ciclo glacial/interglacial. Es decir, no se puede decir nada acerca de la amplitud de los ciclos, sólo de su frecuencia natural.

De las curvas obtenidas se deduce que las condiciones extremas esperables en el próximo millón de años no excederán las sufridas en el último millón de años. Todos muestran persistencia de los ciclos glaciales que han marcado el Cuaternario. También se destaca el modelo en "diente de sierra" de los resultados, es decir, la rápida deglaciación y calentamiento seguido por un enfriamiento más lento a menudo interrumpido, hacia la siguiente glaciación. Se han comparado las reconstrucciones climáticas de los últimos 120 ka y las proyecciones para las siguientes decenas y centenares de miles de años (Goodess et al., 1991, Berger et al, 1991) y a pesar de pequeñas discrepancias, los grandes cambios son comunes a todos. Estos modelos sugieren que dejando a un lado la influencia del hombre, y considerando sólo las variaciones astronómicas, se debería iniciar un enfriamiento oscilatorio con episodios cada vez más fríos dentro de 5, 23 y 60 ka AP. Este último se espera alcance la intensidad del Último Máximo Glacial. El análisis de la duración de estadios climáticos en el pasado (aproximación empírica)

también indica que con o sin calentamiento por efecto invernadero, el presente interglacial terminará en poco tiempo. Continuando con los modelos semiempíricos, posteriormente seguirá un cambio gradual hacia condiciones más cálidas. Todos los modelos indican que climas tan cálidos como el actual son raros. No se espera volver a las condiciones del óptimo térmico del Holoceno hasta dentro de 120 ka. En muchos de los estudios aparece un periodo cálido en torno a los 75 ka AP, que parece seguirse de una glaciación hacia los 100 ka AP, aunque los estudios difieren sobre si este suceso es más o menos severo que el que se producirá dentro de 60 ka.

Los modelos orbitales anteriores no reproducen satisfactoriamente toda la variabilidad observada en el registro paleoclimático. Esto se debe fundamentalmente a las muy diferentes escalas temporales de los muchos forzamientos que actúan. Es decir, los cambios climáticos relacionados con los forzamientos orbitales explican sólo el 60% de la varianza observada en el registro isotópico de los últimos 780 ka y el 85% de la misma si las ventanas son 4 bandas estrechas alrededor de las frecuencias orbitales. El resto se explica por variabilidad solar y actividad volcánica, junto con mecanismos estocásticos, ninguno de ellos predecible.

4. Construcción de escenarios climáticos para la Península Ibérica

En el caso de la Península Ibérica abundan los datos fragmentarios. Muchos registros aportan sólo una descripción cualitativa de las condiciones climáticas. No obstante, están surgiendo registros nuevos, no sólo a escala regional, sino también global. Actualmente ENRESA está iniciando un Proyecto para la obtención de series polínicas continuas en la Cuenca de Baza (Cúllar) y Padul. Los resultados que se obtengan permitirían llevar a cabo una revisión del presente trabajo.

Con anterioridad ENRESA, en colaboración con el ITGE y el BRGM francés han llevado a cabo el Proyecto comunitario "Paleoclimatological revision of climate evolution in western mediterranean region" Proyecto CE-FI2W-CT91-0075. Hasta ese momento había muy pocos datos disponibles acerca de la evolución climática pasada en la Península Ibérica. Este proyecto ha permitido reconstruir de manera cualitativa el paleoclima de los dos últimos millones de años.

Los objetivos de partida fueron la obtención de información de la evolución climática y de cambios medioambientales en la Península Ibérica y países mediterráneos circundantes durante el Cuaternario y la reconstrucción paleoambiental de un emplazamiento dentro de la Península Ibérica durante los últimos 100 ka y la construcción de escenarios de evolución futura (Bajos, C. y Barettino, D. 1993). El proyecto se estructuró en seis tareas:

- 1) Síntesis del medio ambiente en España durante los 2 últimos Ma. Evolución paleoambiental durante el Cuaternario en el contexto europeo y las regiones mediterráneas del oeste.
- 2) Investigación de la evolución paleoambiental cuaternaria de un sector del Valle del Tajo.
- 3) Reconstrucción paleoclimática desde el Pleistoceno Medio sobre análisis geocronológicos e isotópicos de travertinos españoles.
- 4) Reconstrucción climática de los últimos 1000 años de la zona centro española basándose en series dendrocronológicas.
- 5) Contribución a la reconstrucción paleoambiental y construcción de escenarios de evolución futura.
- 6) Integración y actividades de coordinación.

La información disponible se introdujo en una BD y se integró con un sistema de información geográfica (GIS), permitiendo construir mapas de evolución climática de la Península Ibérica para los últimos 130 ka (Barettino, D., Alberruche, E., Delgado, F.J., 1993).

Se definieron paleoclimas de manera cualitativa por el tipo de información disponible, en función del clima actual en las regiones consideradas. Para la reconstrucción paleoclimática se extrapoló la información de los distintos registros de carácter puntual a las correspondientes regiones climáticas, utilizando, como ya se ha mencionado, el sistema de información geográfica, GIS ARC/INFO.

Este trabajo permitió poner de evidencia los importantes procesos de excavación e incisión fluvial que tuvieron lugar en un pasado reciente. Tal es el caso de la zona de depósitos de travertinos de río Blanco (Soria), donde la captura del Jálón ha dado lugar a una espectacular incisión, Fig. 1. Más importante ha sido el poder validar los análisis isotópicos en travertinos: se ha encontrado, Fig. 2, que existe una buena covarianza entre las isotopías de oxígeno y carbono y los registros palinológicos. Ello ha abierto una excelente vía de trabajos de investigación paleoclimática futura.

Dado que nuestros mejores registros paleoclimáticos no se extienden más allá de un ciclo glacial/interglacial, no podemos estimar la duración de antiguos estados climáticos en la Península más que para este ciclo, con lo que no podemos establecer rangos de duración. Por tanto, nos tendremos que apoyar en los modelos de Milankovitch para intentar establecer una secuencia climática futura.

Para la reconstrucción paleoclimática del último ciclo glacial/interglacial se ha realizado un análisis comparado de los sondeos P2 y P3 de Padul, Granada (Pons and Reille, 1988), el sondeo KET 8003 del mar Tirreno (Rossignol-Strick and Planchais, 1989) y las secuencias de temperatura y precipitación en les Echets y en La Grande Pile.

Por otra parte, se ha tenido en cuenta que en la Península Ibérica se diferencian dos regiones biogeográficas, la Mediterránea y la Eurosiberiana, cuyo límite se sitúa, en la actualidad, en las vertientes meridionales de la Cordillera Pirenaica y Cantábrica, al norte, y entre las zonas oceánicas más continentales y meridionales de Galicia y del N. de Portugal, al oeste (Mesón, M. y Montoya, M., 1993). Se corresponden, en términos generales, con las denominadas Zona Verde y Zona Parda, o también con "La España Húmeda" y "La España Seca", respectivamente. En ambas regiones biogeográficas se han delimitado distintos pisos bioclimáticos, entendiéndose por "piso bioclimático o de vegetación" cada uno de los tipos o espacios termoclimáticos que se suceden en función de la altitud o de la latitud (Mesón, M. y Montoya, M., 1993). A su vez, dentro de cada piso bioclimático se distinguen, en función de las precipitaciones (ombroclima), diferentes tipos de vegetación.

Los bioclimas de la región Mediterránea son bioclimas xéricos, es decir, que poseen una estación que es netamente sentida como seca por la vegetación. Convencionalmente se acepta que un mes tiene carácter árido cuando la precipitación en el mismo, expresada en mm, es numéricamente inferior al doble de la temperatura media mensual, expresada en °C.

La vegetación natural que corresponde a la zona climática se denomina vegetación zonal, aunque esta vegetación puede darse extrazonalmente en otras zonas climáticas en biotopos especialmente favorables, como es el caso de los bosques en galería a lo largo de los cursos de agua en regiones esteparias o semidesérticas.

En las latitudes que corresponden a la Península Ibérica encontramos dos zonas climáticas princi-

pales, la Zona de transición con lluvias invernales (clima típico de la región mediterránea sin estación fría y una larga sequía estival) y la Zona de clima temperado (invierno frío pero no demasiado largo y con un verano fresco, de tipo oceánico húmedo).

5. Escenarios de cambio climático a largo plazo

El análisis comparado realizado a partir de la información disponible en los sondeos P2 y P3 de Padul, el sondeo KET 8003 del mar Tirreno y las secuencias de temperatura y precipitación en Les Echets y en La Grande Pile, junto con las curvas de variación de la insolación a 60 °N en función del tiempo (entre 150 ka BP y 100 ka AP) de Berger (1988) y, especialmente, las variaciones del índice climático astronómico ACLIN1 y su extrapolación a 100 ka AP (Kukla et al., 1988), permite definir sobre la curva ACLIN1, desde 125 ka BP a la actualidad, una serie de situaciones que, a grandes rasgos, parecen repetirse entre los 0 ka y los 125 ka AP. Estas situaciones que, inicialmente, no son sino secuencias acotadas del índice ACLIN1 morfológicamente semejantes a otras previas identificadas sobre el intervalo temporal recorrido por una determinada sección o corte estratigráfico, podrían adquirir la calificación de "escenarios climáticos" si son adecuadamente descritas (bio)climáticamente a partir del espectro polínico (o por otros medios) del registro de dicha sección estratigráfica, entendiendo por escenario climático, con Wigley et al., 1986, "imágenes internamente consistentes de un plausible clima futuro".

En líneas generales, tanto el índice climático astronómico ACLIN de Kukla et al. (1981) como los demás modelos basados en la teoría astronómica de las variaciones climáticas confirman que el presente período interglacial cuyo máximo u óptimo climático se produjo hacia 6 ka BP, durante el denominado período Atlántico, del Megatermal, está evolucionando hacia condiciones glaciales que podrían alcanzarse dentro de unos 23 ka. No todos los modelos, como ya se ha dicho, coinciden en pronosticar un primer mínimo térmico con anterioridad a los 23 ka AP.

La glaciación de los 60 ka AP podría llegar a ser tan severa o más que la de 18 ka BP, en el Último Máximo Glacial. A partir de este punto se pronostica un período cálido, probablemente de carácter interestadial templado, centrado en los 75 ka AP,

y un nuevo período frío glacial entre 100 y 110 ka BP, muy probablemente seguido de un nuevo interglacial entre 120-125 ka AP, que alcanzaría las condiciones del óptimo climático del Holoceno.

A la hora de establecer los posibles escenarios climáticos futuros a largo plazo (125 ka) para la Península Ibérica habremos de tener en cuenta, en primer lugar, las regiones biogeográficas que se diferencian de la Península Ibérica así como los distintos pisos bioclimáticos y su descomposición en función de las precipitaciones.

No obstante las limitaciones que se han señalado hasta aquí con respecto a la generalidad con que puedan establecerse los escenarios climáticos a largo plazo en la Península Ibérica, sí es posible identificar, sobre la curva de evolución del índice ACLIN1 (Figura 3), las siguientes situaciones a uno y otro lado del tiempo 0 ka y, más exactamente, si tomáramos como eje los 6 ka BP:

- 1) Un descenso relativamente rápido del valor del índice desde una clase climática interglacial a otra de carácter estadal. El índice ACLIN1 cae desde 4.3 a 1.5 en unos 10 ka.

Esta situación se dió entre 120 ka BP y 110 ka BP (subestadios isotópicos 5e y 5d) y podría tener un análogo climático entre 0 ka y 20 ka AP. y desde 72 ka a 83 ka AP.

- 2) Una variación climática intra-estadal con un tramo inicial de recuperación climática, un tramo final de empeoramiento y un tramo central de carácter estadal. El índice ACLIN1 evoluciona entre 1.5 y 3.5 en períodos de 30-40 ka.

Es la situación representada por la mayor parte del estadio isotópico 3 (62-22 ka BP), y que volverá a producirse, muy probablemente, entre los 25 ka y los 56 ka AP.

- 3) Episodios netamente glaciales (índice ACLIN1 1.5).

Corresponde al Último Máximo Glacial, entre 22 y 15 ka BP. Volverá a darse, previsiblemente, entre 56 ka y 64 ka AP y entre 108 ka y 115 ka AP. Existe una variante de menor intensidad, entre 69 y 62 ka BP que puede constituir un antecedente del mínimo climático de entre 20 y 25 ka AP. Estadios isotópicos 2 (parcialmente) y 4, respectivamente.

- 4) Recuperación climática postglacial (glacial-interglacial). El índice ACLIN1 evoluciona desde 1.5 a 4.3 en menos de 10 ka.

Refleja la evolución climática durante los estadios climáticos 1 (parcialmente) y final del

2, entre 15 y 8 ka BP. Se anticipan situaciones análogas desde 64 ka a 72 ka AP y desde 115 ka a 120 ka AP.

- 5) Estado climático claramente interglacial. El índice ACLIN1 se mantiene por encima de 4.3 durante periodos del orden de los 10 ka.

Corresponde al actual interglacial, desde los 8 ka BP hasta el momento presente. Imbrie and Imbrie (1979) postulan su finalización dentro de los próximos 2 ka (Goodess et al., 1991). Sin embargo, la curva ACLIN1 de Kukla et al. (1981) da por terminado este estado climático hacia el momento actual. Esta precisión puede ser poco relevante en este marco debido a la superposición del efecto invernadero de origen antrópico que puede estar induciendo un "super interglacial" (Imbrie and Imbrie, 1979) de hasta 2 ka de duración y que llevaría la temperatura media global hasta los 17 °C.

Las incertidumbres asociadas a este efecto de origen antrópico hacen cuestionable la utilización de este estado climático como potencial análogo de una situación de futuro a largo plazo, cuando los combustibles fósiles estén agotados. Descontando el efecto invernadero reforzado, podrían darse situaciones análogas a la registrada desde 8 ka BP entre los 120 ka y los 130 ka AP.

Estas cinco situaciones o escenarios climáticos-tipo resumen la variabilidad detectada por el índice ACLIN1 desde los 130 ka BP. A su vez, es posible proyectarlas hacia los 125 ka AP y caracterizarlas, muy preliminarmente, en sus condiciones termoclimáticas y ombroclimáticas a partir del registro palinológico.

6. Sucesión climática futura

En función de lo expuesto hasta aquí podría esperarse una secuencia de acontecimientos climáticos como la siguiente:

- ❑ 0-2 ka AP: Condiciones templadas. Clase climática ACLIN1, interglacial. Efecto invernadero reforzado por acción humana directa. Escenario climático tipo 5.
- ❑ 2-20 ka AP: Enfriamiento probablemente muy rápido hasta los 5 ka AP. Oscilación climática de carácter estadal entre 5 y 20 ka AP. Clases climáticas ACLIN1, interestadial y estadal, en secuencia. Escenario climático tipo 1.
- ❑ 20-25 ka AP: Condiciones glaciales, probablemente en su versión atemperada. Escenario climático tipo 3b.

- ❑ 25-56 ka AP: Condiciones estadales-interestadales semejantes a las del estadio isotópico 3. Escenario climático tipo 2.
- ❑ 56-64 ka AP: Condiciones netamente glaciales, análogas a las del estadio isotópico 2. Clase climática ACLIN1, glacial. Escenario climático tipo 3a.
- ❑ 64-72 ka AP: Recuperación climática hasta condiciones interestadales templadas (tipo interestadial Bölling-Alleröd o St. Germain II). Escenario climático tipo 4.
- ❑ 72-108 ka AP: Enfriamiento rápido hasta los 83 ka AP y mucho más lento hasta los 108 ka AP. Clase climática ACLIN1, interestadial-estadal. Escenario climático tipo 1.
- ❑ 108-115 ka AP: Condiciones glaciales, probablemente como durante el estadio isotópico 4. Escenario climático tipo 3b.
- ❑ 115-120 ka AP: Recuperación climática postglacial semejante a la del estadio isotópico 1 y final del 2. Escenario climático tipo 4.
- ❑ 120-130 ka AP: Condiciones templadas. Clase climática ACLIN1, interglacial. Escenario climático tipo 5.

Estos acontecimientos climáticos admiten mayores precisiones a la hora de establecer escenarios de detalle para una evaluación concreta. Sin embargo, las incertidumbres asociadas podrían ser importantes al estar basados en una única sección de control.

7. Conclusiones

Los resultados del proyecto EVEREST (y también los del Dry Run3 del Reino Unido) muestran que el futuro cambio climático puede tener influencia en la migración de los radionucleidos a través de la barrera natural geológica y como consecuencia influir en las tasas de dosis esperables.

En la evaluación del comportamiento de los sistemas de almacenamiento en formaciones geológicas profundas está admitido que el camino más probable para un eventual retorno de los radionucleidos al medio ambiente accesible es el transporte por las aguas subterráneas. En muchos de los ejercicios de evaluación llevados a cabo hasta el momento, el campo de flujo hidrogeológico en el que se producirá el transporte de los radionucleidos se ha tomado como independiente del tiempo. Sin embargo, de manera creciente se admite que esta aproximación resulta demasiado

simplista y que los cambios en el régimen de flujo subterráneo pueden llegar a tener un efecto sustancial en la evaluación del impacto radiológico de los almacenamientos. Incluso, como se ha visto en Sellafield y otros emplazamientos (Yucca Mountain, por ejemplo), puede que no se explique el actual régimen hidrogeológico sin hacer referencia a la evolución del clima en la región en las últimas decenas de miles de años, en particular desde la última glaciación.

Dos consideraciones, por tanto:

- 1) las largas escalas temporales relevantes para la estimación cuantitativa del riesgo radiológico, y
- 2) las vías específicas por las que los radionucleidos pudieran entrar en la biosfera,

hacen del estudio del cambio climático en el futuro un tema de importancia, hasta el punto de que no parece verosímil que pueda llevarse a cabo, actualmente, un estudio de seguridad o incluso una evaluación del comportamiento post-clausura de una instalación para el almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos sin tener en cuenta la evolución climática en la región del emplazamiento. Incluso en el caso de que pudiera demostrarse que el transporte de los radionucleidos desde el almacenamiento es indiferente a la evolución del clima en el futuro, seguiría éste siendo de importancia en cuanto al transporte y distribución de los radionucleidos en el sistema hidrológico sub-superficial (acuíferos someros y flujo hipodérmico) y en las aguas de superficie. Clima y geomorfología (a su vez ésta dependiente de la evolución climática), junto con las características de la vegetación que se postule con arreglo al bioclima, proporcionarían, en este caso, las bases para estudiar la hidrología y la hidrogeología, que suministran los datos de entrada a los modelos detallados de distribución y transporte de los radionucleidos en el medio ambiente desde su liberación a la biosfera. En este sentido, el estudio de la evolución climática futura tiene dos cometidos principales:

- 1) definir las condiciones de contorno tiempo-dependiente adecuadas para la determinación y cálculos del flujo subterráneo y del transporte de radionucleidos, y
- 2) especificar las características medioambientales (climáticas, edafológicas, geomorfológicas y de vegetación) en que se producirían los retornos de radionucleidos desde la geosfera.

Los estudios de seguridad de los almacenamientos de residuos radiactivos requieren así intervalos

temporales de al menos un ciclo glacial-interglacial, unos 100 ka.

Si el forzamiento orbital está acreditado como la causa principal del cambio climático durante el Cuaternario (1.6 Ma) y a largo plazo, hay una gran posibilidad, sin embargo, de que en el próximo milenio el mecanismo principal del cambio climático sea el calentamiento derivado del efecto invernadero de origen antropogénico, hasta el punto de que podría darse un episodio, insólito en el registro geológico, identificado como un "super interglacial" que se superpondría a la evolución "natural" del ciclo glacial/interglacial, conduciendo a una temperatura global más alta que la del óptimo climático holoceno (6 ka BP) y que la registrada durante el interglacial Eemiense (120 ka BP). Este episodio podría durar 1 ka e iría acompañado de una elevación del nivel del mar de hasta 5 m hacia el 2200.

En la Península Ibérica son más frecuentes los datos paleoclimáticos de tipo fragmentario. El trabajo de ENRESA, junto con el ITGE y el BRGM "Palaeoclimatological revision of climate evolution in Western Mediterranean Region", de 1993 ha permitido una síntesis del medioambiente en España durante los 2 últimos millones de años y construir mapas de evolución climática en los últimos 130 ka, extrapolando a las actuales diferentes regiones climáticas peninsulares la información paleoclimática obtenida de los registros locales inventariados.

La construcción de escenarios climáticos a largo plazo para la Península Ibérica, tal como aquí se propone, parte de considerar la existencia de dos regiones biogeográficas, Mediterránea y Eurosiberiana, en las que se diferencian diversos pisos bioclimáticos. El estudio ha hecho uso del trabajo previo de Pons y Reille (1988) sobre la turbera de Padul (Granada) y, parcialmente, de los de Rossignol-Strick y Planchais (1989) y de Guiot, Pons, de Beaulieu y Reille (1989) sobre el sondeo KET 8003 del Mar Tirreno, y sobre Les Echets y La Grande Pile, respectivamente.

La metodología seguida comprende dos pasos:

- 1º Construcción de sucesiones climáticas, utilizando secuencias de climas pasados (la secuencia polínica de Padul, interpretada) y de los modelos climáticos orbitales (Kukla et al., 1981; Berger, 1978; Berger et al., 1991).
- 2º Selección de análogos climáticos.

De las tres fuentes de datos climáticos que permiten caracterizar los estados climáticos (datos pa-

leoclimáticos, fundamentalmente palinológicos en latitudes medias; ejercicios con modelos de circulación general 3D en estado de equilibrio, y datos instrumentales de estaciones meteorológicas seleccionadas) se ha optado por el primero ya que el estudio es de carácter general, no específico de un emplazamiento cuyas condiciones geográficas serían clave para la selección de las estaciones analógicas. La clasificación climática utilizada es la de Font Tullot (1984) para los rangos termo y ombroclimáticos, y la de Walter (1973, 1994) para las zonas de vegetación. Se ha utilizado, asimismo, el trabajo de Garcin y Godefroy (1995) para delimitar los potenciales estados climáticos futuros sobre la curva ACLIN1 de Kukla et al. (1981).

Se proponen cinco situaciones o escenarios climáticos tipo que resumen la variabilidad detectada en el registro paleoclimático desde los 130 ka BP. Estos escenarios climáticos-tipo recubren la gama de situaciones definidas por el índice climático ACLIN1 en los 125 ka AP. Para la definición o caracterización de los escenarios climáticos se ha elegido trabajar en base a sus bioclimas ya que éstos admiten una doble definición climática y vegetal, con lo que es posible determinar el bioclima a partir de la vegetación y deducir ésta del espectro polínico.

Conjugando los escenarios climáticos tipo y los umbrales del índice ACLIN1 se establece una posible sucesión climática futura desde la actualidad a los 125 ka AP.

En este intento de definir escenarios climáticos a muy largo plazo en la Península Ibérica la caracterización de la biosfera sólo puede proporcionar condiciones climáticas de carácter regional. Los sondeos P2 y P3 de Padul sólo dan información climática de la región biogeográfica Mediterránea en la que probablemente ha permanecido Padul desde el interstadial St. Germain I (104 ka BP). Sin embargo, los límites de las dos regiones biogeográficas peninsulares han podido variar a lo largo del último ciclo glacial en función de las condiciones climáticas globales, dificultando hacer extensiva a la totalidad del área peninsular, hoy como región biogeográfica Mediterránea, la sucesión climática futura que se propone.

Sería conveniente, por tanto, contar al menos con una sección estratigráfica adecuada del Pleistoceno superior-Holoceno en la zona biogeográfica Eurosiberana de la Península Ibérica para conocer, con el mayor detalle posible, la evolución de los acontecimientos paleoclimatológicos y/o

paleoambientales durante dicho período de tiempo y complementar la información ya disponible en Padul.

No obstante, la oscilación de los límites entre ambas regiones que se deduce de comparar la reconstrucción paleoclimática de la Península en el Último Máximo Glacial y la situación actual exigiría ubicar, con cierta precisión, dichos límites a lo largo de los 125 ka futuros, en cada uno de los escenarios climáticos. En la "Síntesis del Medio Ambiente en España durante los dos últimos millones de años", de ENRESA e ITGE (1993), E. Badal y P. Roirón apuntan una serie de zonas cuya consideración podría aportar un mejor conocimiento de la extensión de las regiones biogeográficas de la Península en el pasado, complementar la información paleoclimatológica ya disponible y permitir regionalizar la potencial evolución climática futura a largo plazo. Entre dichas zonas pueden citarse Plà de l'Estany (Gernoua), al menos en su sección Prewurm (118-75 ka BP); La Franca (Asturias), la cueva de Lezetxiki (Guipúzcoa); los depósitos lacustres de Olot (Gerona); Quintanar de la Sierra (Burgos) que cuenta con una secuencia polínica completa desde el Tardiglacial al Holoceno; Burela (Lugo) y Sanabria (Zamora). Atapuerca (Burgos) tiene el gran interés de encontrarse en el cruce de influencias mediterráneas, atlánticas y continentales, aunque se citan en relación con el Pleistoceno inferior y medio; igual que el lago de Banyoles (Gerona) o Bobila Ordiz (Gerona).

En la región Mediterránea sería muy conveniente tratar conjuntamente la Carihuela (Granada) y Padul para analizar la evolución climática en los niveles altitudinales mediterráneos, al menos desde el Prewurm más detenidamente que lo realizado en este trabajo.

Finalmente, señalar la conveniencia de analizar las condiciones bioclimáticas de las regiones actuales que apuntan como potenciales análogos climáticos para la Península en los estadios climáticos 3 y 4, las zonas de estepas y desiertos fríos en invierno que se extienden en Eurasia desde el Mar Negro hasta el Caspio y Asia Central.

Bibliografía

- Alberruche del Campo, E. 1993. Evolución General del Clima durante el Cuaternario. En: Síntesis del Medio Ambiente en España durante los dos últimos millones de años. ENRESA, ITGE.

- Badal, E. y Roiron, P., 1993. La vegetación continental. En: *Síntesis del Medio Ambiente en España durante los dos últimos millones de años*. ENRESA, ITGE.
- Bajos, C. y Baretino, D., 1993, "Paleo-climatological revision of climate evolution and environment in western mediterranean regions", CEC CONTRACT F12W-CT91-0075, Final Report, ENRESA, BRGM, ITGE.
- Baretino Fraile, D., Alberruche del Campo, E. y Delgado Martínez, F. J., 1993, "PROYECTO: Paleoclimatological Revision of Climate Evolution in Western Mediterranean Region. Subproyecto: Base de Datos Paleoclimáticos y Paleoambientales. Reconstrucción del clima peninsular a lo largo del Cuaternario", CE-F12W-CT91-0075.
- Berger A., 1988, "Milankovitch theory and climate", *Reviews of Geophysics*, 26(4), 624-657.
- Berger A., et al., 1991, "The Earth's future climate at the astronomical time scale", In C.M. Goodess and J. Palutikof (Editors), *Proceedings of the International Workshop on Future Climate Change and Radioactive Waste Disposal*. NIREX Safety Serie, NSS/R257, pp. 148-165.
- BRGM R 36737 SGN/GEO/93. L'environnement de l'Espagne au Quaternaire (l'Espagne au Quaternaire dans le contexte géologique et paleoenvironnemental Ouest-Européen et péri-Méditerranéen Occidental). Defaut B., Courbouleix S., Garcin M., Gros Y. (1992).
- Canceill et al.: Evolution naturelle d'un site de stockage de déchets radioactifs à vie longue: essai de modélisation dans le cadre d'une approche géoprospective. *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.*, 32: 25-47 (1985).
- Canceill, M., S. Courbouleix, J. Fourniguet, P. Godefroy, Y. Gros, B. Manigault and P. Peaudecerf.: *Etude de Géoprospective d'un Site de Stockage. Simulation de l'évolution d'un site à l'aide du programme "CASTOR"*. BRGM. Rapport 84 SGN 229 STO. EUR 9866 FR (1984).
- Dove, F.H. y 14 más, 1982. AEGIS Technology Demonstration for a Nuclear-Waste Repository in Basalt. PNL-3632, UC-70.
- ENRESA, 1993, "Síntesis del Medioambiente en España durante los dos últimos millones de años", Contrato CEC F12W-CT91-0075, Informe temático.
- EUR 16751 EN, 1996. Consideration of environmental changes in long-term radioactive waste disposal system evaluations.
- Filippi, Ch., J. Fourniguet, P. Godefroy, B. Manigault and P. Peaudecerf: *Étude géoprospective des sites de stockage: validation sur l'évolution passée d'une région (paleosite)*. CEC EUR 10933 FR (1987).
- Font Tullot, I (1984), "Climatología de España y Portugal", Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 296 pg.
- Font Tullot, I. 1988. *Historia del Clima de España. Cambios climáticos y sus causas*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid.
- Fourniguet, J.: Predictive geology in the analysis of the repository evolution: Description of the relevant natural phenomena. In: *Advanced Seminar on Risk Analysis in Nuclear Waste Management*. Ispra Courses. CEC. JRC.RAN/88/13, (1988).
- Garcin, M. and Godefroy, P. 1995. Evolution future du site du Jarama à l'échelle de 100000 ans. Rapport BRGM SGN/UPE N 1907.
- Goodess, C.M. and Palutikof, J.P., 1991. The UK approach to studies of climate change and radioactive waste disposal. In: *Proceedings of the International Workshop on Future Climate Changes and Radioactive Waste Disposal*. Nirex Safety Series, NSS/R257.
- Guiot J., Pons A., de Beaulieu J.L. & Reille M., 1989, "A 140.000-year continental climate reconstruction from two European pollen records", *Nature*, Vol. 338.
- Imbrie, J. and Imbrie, K.P., 1979. *Ice Ages, Solving the Mystery*. Macmillan Press, London.
- Imbrie, J. and Imbrie, J.Z.: Modeling the climate response to orbital variations. *Science* 207, 943-953. (1980).
- King L. M. et al., 1994, "Ice-front scenarios: SKI's SITE-94 Project to evaluate the future behaviour of a deep repository for spent-fuel", *Actes du Colloque GEOPROSPECTIVE*, Paris UNESCO.
- Kukla G. et al, 1981, "Orbital signature of interglacials", *Nature*, 290 (5804), 295-300.
- Laurens, J-M and S. Appleton.: *Vandal (version 1.3): Verification test plan*. UK Department of Environment, Disposal Assessments Technical Report, TR-EWE-23. (1989).
- Laurens, J-M., B.G.J. Thompson and T.J. Sumerling: *The Development and Application of an Integrated Radiological Risk Assessment Procedure using Time-Dependent Probabilistic Risk Analysis*. CEC/IAEA/OECD International Symposium on Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories. París. October 1989. (1990).
- Mesón, M. y Montoya, M., 1993. *Selvicultura Mediterránea*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- Pons A. and Reille M., 1988, "The Holocene and upper Pleistocene pollen record from Padul (Granada, Spain): a new study", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66: 243-263.

- Recreo, F. (coord.), Bajos Parada, C., García-Olivares Rodríguez, A., Franco Herrero, A., Torres Vidal, C. and Prado Herrero, P. 1996. Consideration of environmental changes in long-term radioactive waste disposal system evaluations. European Commission. EUR 16751 EN.
- Rossignol-Strick M. and Planchais N, 1989, "Climate patterns revealed by pollen and oxygen isotope records of a Tyrrhenian sea core", *Nature*, 342 (6248), 413-416.
- Thompson, B.G.J.: The development of procedures for the risk assessment of underground disposal of radioactive wastes: Research funded by the Department of the Environment, 1982-1987. *Rad. Waste Man. and the Nucl. Fuel Cycle*, Vol. 9 pp. 215-256. (1987).
- Thompson, B.G.S. and B. Sagar.: The development and application of integrated procedures for post-closure assessment, based on Monte Carlo simulation. The Probabilistic System Assessment (PSA) Approach. (1993).
- Tsonis, A.A.: Sensitivity of the global climate system to initial conditions, I. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 72: 313-328. (1991).
- Walter, H. 1973. *Vegetationszonen und Klima* Eugen Ulmer. Stuttgart.
- Walter, H. 1993. *Zonas de Vegetación y Clima*. Ediciones Omega. Barcelona.
- Wigley, T.M.L., Jones, P.D. and Kelly, P.M., 1986. Empirical climate studies: warm world scenarios and the detection of climatic change induced by radiatively active gases. In: B. Bolin, B.R. Doos, J. Jäger and R.A. Warrick (eds), *The Greenhouse Effect, Climate Change, and Ecosystems*, SCOPE 29, Wiley, N.Y.
- Wolman, M.G.: Planet earth: part III, the impact of man. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 72: 884-886. (1991).
- Zektser, I.S. and Loaiciga, H.A.: Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *J. of Hydrology*, 144 (1993).

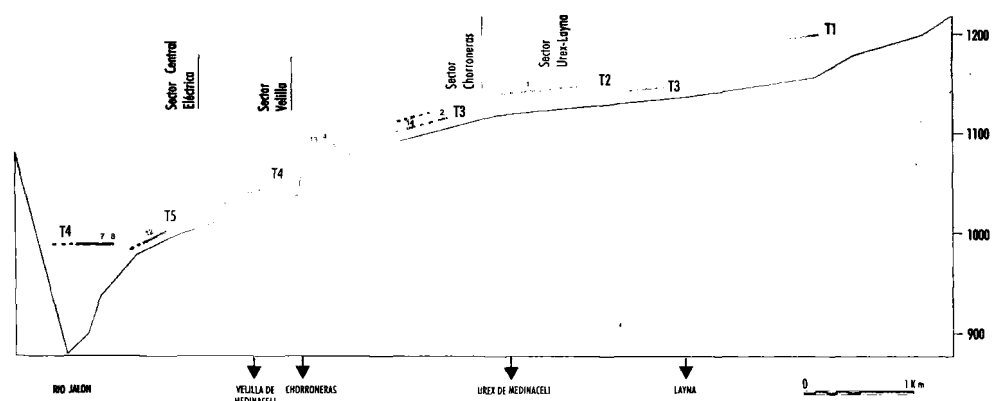


Figura 1. Topostratigrafía de las terrazas travertínicas de Río Blanco.

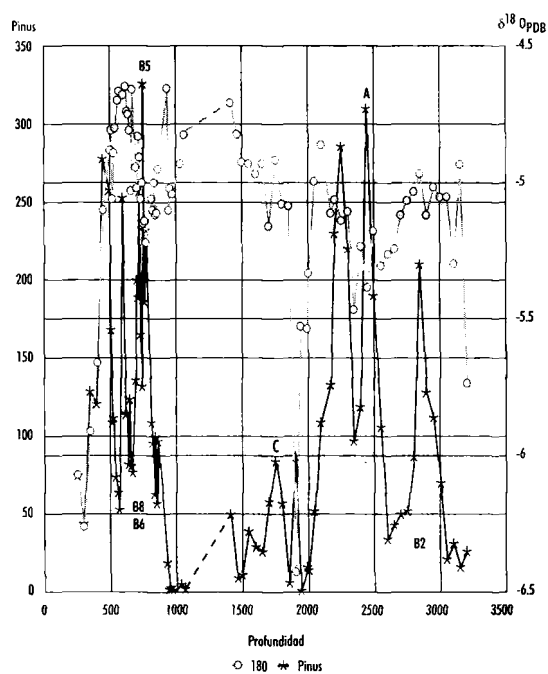


Figura 2. Evolución de la frecuencia de granos de polen de *Pinus*/ $\delta^{18}\text{O}$ en el sondeo de Banyoles (BY).

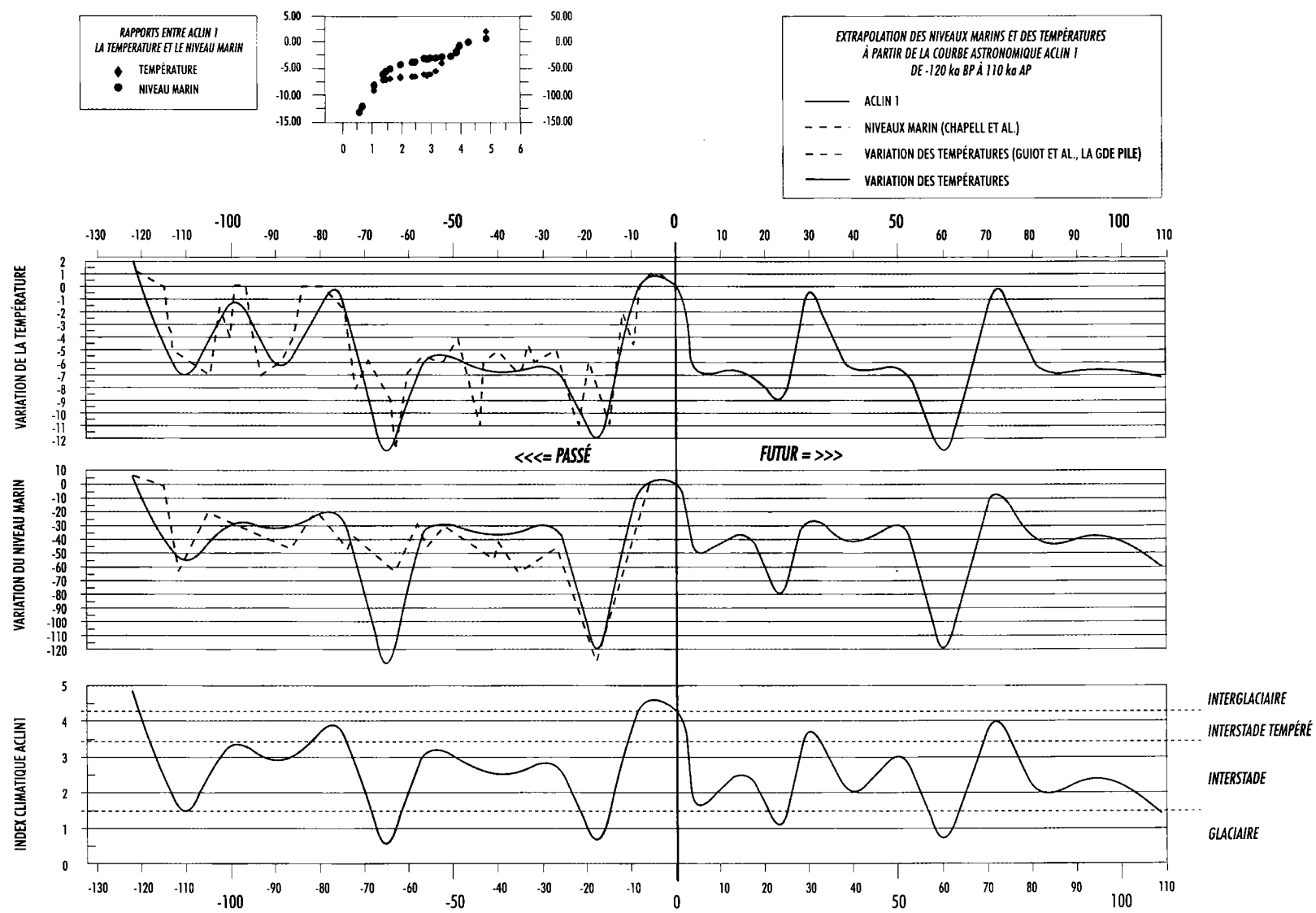


Figura 3. Variación del Índice Climático ACLIN 1 entre 120 ka BP y 110 ka AP. Extrapolación de los niveles del mar y de las temperaturas a partir de la curva astronómica ACLIN 1. Rapport BRGM SGN/UPE N 1907. Enero 1995. (García, M. y Godefroy, P.).